1990—2020年波曲流域冰川冰湖时空变化及其对气候变化的响应

王小丽， 周凌翔， 王秀东， 何 颖
（重庆师范大学地理与旅游学院GIS应用研究重庆市高校重点实验室，重庆 401331）

摘 要：基于Landsat TM/ETM+/OLI遥感影像和数字高程模型（DEM）数据，结合比值阈值法与目视解译提取了1990—2020年波曲流域冰川边界，同时利用归一化水体指数与目视解译提取波曲流域冰湖数据，分析近30 a波曲流域冰川冰湖空间分布与变化特征以及母冰川-冰湖相对位置变化关系，探究波曲流域冰川冰湖协同演化及其与气候变化的响应关系。结果表明：（1）1990—2020年波曲流域冰川加速退缩，尤其是近10 a来冰川加速退缩趋势更为显著；波曲流域冰川主要分布在海拔5500~6100 m范围内，规模上看，大规模（≥10 km²）冰川数量保持稳定，小规模（≤0.5 km²）冰川数量呈增加趋势。（2）近30 a波曲流域冰湖数量、面积均不断增加，冰湖面积扩张率为74.24%；冰湖主要分布在海拔4900~5300 m之间，大冰湖（≥0.07 km²）面积不断扩张；小冰湖（≤0.03 km²）数量增加显著。（3）与母冰川相连冰湖是最重要的冰湖扩张类型，该类型冰湖面积增长量占总冰湖增量的72.08%。（4）近30 a波曲流域气温缓慢上升，降水量总体略微下降。气温上升和降水量下降是造成冰川退缩重要因素，同时冰川融水促进冰湖扩张。通过波曲流域冰川-冰湖分布面积、变化特征及其协同演化关系的探究为流域冰川面积变化趋势和冰湖溃决灾害的预测及防治提供数据支撑。

关 键 词：波曲流域；冰川退缩；冰湖扩张；气候响应
文章编号：1000－6060（2024）05－0810－10（0810～0819）

冰川在气候系统变化中扮演着重要角色，被认为是全球气候变化敏感指示器[1]，其变化直接影响全球地表水热平衡。冰川融水形成的河川径流对干旱半干旱地区人类活动有着极为重要的作用，在一定程度上影响着区域的生态环境和社会经济可持续发展[2]。短期内的冰川融水可能会增加河川径流量，有助于缓解干旱半干旱区农业畜牧业的生存和发展的用水压力；但从长远和可持续发展的角度来看，当冰川面积减少到一定程度后，冰川径流降低，这势必会改变流域的径流组成、水资源量及季节分配，进而影响当地区域的生产、生活和生态用水，加剧绿洲经济和生态系统用水供需矛盾[3-5]。

冰湖是区域冰川变化及水循环对全球气候变化响应的信息载体[6-8]，目前对冰川冰湖相互关系研究主要包括冰川补给型湖泊溃决风险评估[9]，冰川补给型湖泊溃决灾害事件的调查分析[10]，典型区域冰川补给型湖泊演化特征[11]等。随着全球气温普遍升高，冰川加速消融，导致青藏高原东南部和喜马拉雅山等地区冰湖溃决等自然灾害频发[12]。因此，研究冰川冰湖的分布和变化特征，对于区域水资源调控和冰湖溃决泥石流灾害防治具有重要现实意义。

波曲流域位于喜马拉雅山中段，属孙科西河支流，流域内冰川消融导致的冰湖溃决及次生灾害时有发生，1935年以来波曲流域曾多次暴发大规模冰湖溃决泥石流，这给当地居民生命、财产以及生态环境带来了极大威胁[13-14]。前人对波曲流域冰川冰湖分布与变化特征做了相关研究[15]，但研究时段较

收稿日期：2023-09-21； **修订日期**：2024-01-02
基金项目：国家自然科学基金项目（42071277）；重庆市教育委员会人文社会科学研究项目（23SKID049）；重庆市教委科学技术研究项目（KJQN202000525）；重庆师范大学基金项目（23XWB032）资助
作者简介：王小丽（1987-），女，硕士，实验师，主要从事地理信息系统与遥感技术应用研究. E-mail: 515849646@163.com

早、间隔较短。基于此，本文采用Landsat系列遥感影像数据，分析了1990—2020年波曲流域冰川冰湖时空变化特征及其与气候变化的响应关系，以期为波曲流域水资源合理利用与水安全、生态安全研究提供理论依据，也为区域冰川冰湖变化的预测及灾害防治提供基础数据。

1 数据与方法

1.1 研究区概况

波曲流域(85°38′~88°57′E，27°49′~29°05′N)位于喜马拉雅山区中段(希夏邦马峰与卓奥友峰之间)，西藏日喀则地区的聂拉木县的南部，是孙科西河支流[15]。流域地形较为复杂，以高山峡谷地貌为主，最高海拔8027 m(希夏邦马峰)(图1)，气候属于山地亚热带湿润气候类型，主要受印度洋暖气流影响，加之地势低和中喜马拉雅山脉对暖湿气流抬升的阻滞作用，因而气候温暖湿润[16]。1990—2020年流域年均气温-0.45 ℃，年最高气温0.44 ℃，年最低气温-1.25 ℃；年平均降水量453.84 mm，最大年降水量581.95 mm，雨季集中在6—8月，降雪期长达6个月以上。

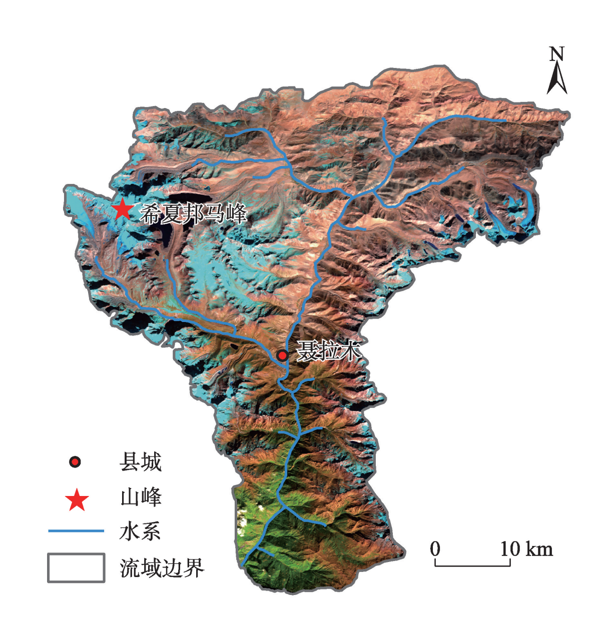


图1 研究区示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the study area

1.2 数据来源

遥感影像主要来源于地理空间数据云(http://www.gscloud.cn/)和美国国家地质调查局(USGS，https://www.usgs.gov/)，空间分辨率为30 m(表1)。为了避免季节性积雪和云的影响，尽量选择夏季时段少云数据[16]。对于冰湖而言，面积受季节影响较大，为了有效避免季节因素带来误差，本文采用了同季节的遥感影像提取冰湖边界。

地形数据源自30 m分辨率的ASRTM GDEM数字高程模型。

气温与降水数据源自中国科学院成都山地灾害与环境研究所数字与遥感应用中心侵蚀地貌过程与生态过程研究团队提供的《青藏高原1901—2020年高分辨率气温数据集》和《青藏高原1901—2020年降水量数据集》，空间分辨率为250 m。

表1 波曲流域冰川冰湖解译影像信息

Tab. 1 Information of glaciers and glacier lakes images in Poiqu Basin

传感器	行号/列号	分辨率/m	云量/%
Landsat4-5/TM	141/40	30	1.00
Landsat7/ETM+	141/40	30	9.17
Landsat4-5/TM	141/40	30	13.81
Landsat8/OLI	141/40	30	4.28
Landsat4-5/TM	141/40	30	1.21
Landsat7/ETM+	141/40	30	0.89
Landsat7/ETM+	141/40	30	28.89
Landsat8/OLI	141/40	30	4.28

1.3 研究方法

1.3.1 冰川边界提取 为提高冰川边界提取效率和精准度，本文采用比值阈值法和人工目视解译提取冰川边界[17-18]，处理过程主要包括：(1) 波段比值。对于Landsat OLI和Landsat TM/ETM+影像，分别采用B4/B6和B3/B5计算波段比值，生成比值图像，得到计算机自动提取的冰川边界解译结果。(2) 阈值选取。阈值的选取直接影响计算机自动提取结果，经过反复试验，对于Landsat TM/ETM+影像，选用1.80作为阈值，而Landsat OLI数据则采用1.00[16]。(3) 二值图像转换。基于选取的阈值，利用决策树分类，将影像分为冰川区和非冰川区，冰川区设为1，非冰川区为0。(4) 目视解译。基于比值阈值法提取的冰川边界数据会受积雪、冰湖、地形等因素影响，为了提高冰川边界解译精度，对流域内逐条冰川进行目视解译。

对于冰湖边界的提取，主要采用归一化水体指数(NDWI)和人工目视解译，首先计算NDWI[19]

$$\mathrm{NDWI}=\frac{\mathrm{green}-\mathrm{NIR}}{\mathrm{green}+\mathrm{NIR}} \quad (1)$$

式中：green为绿光波段，Landsat OLI对应B3波段，Landsat TM/ETM+对应B2波段；NIR为近红外波段，Landsat OLI对应B5波段，Landsat TM/ETM+对应B4波段。

生成比值图像。通过设定阈值，利用决策树分类，将比值图像进行二值化处理，为了提高冰湖边界提取精度，对每个冰湖进行目视解译[20]。

1.3.2 冰湖边界提取 为了提高冰湖解译精度，本文采用目视解译对逐个冰湖边界进行修正。一般而言，冰湖边界提取误差主要源于遥感影像的质量和目视解译主观判断，前人采用边界周长计算面积误差，但部分冰川冰湖连接部分边界难以界定，易造成边界周长的极大偏差，从而导致面积误差范围值过大[21]。最终本文采用第二次冰川编目误差评估办法对冰川、冰湖边界进行分析[22]。

2 结果与分析

2.1 冰川整体面积及变化特征

1990、2000、2010年和2020年波曲流域冰川面积分别为198.95±14.58 km^2、192.13±14.50 km^2、181.89±14.27 km^{2}和168.28±13.72 km^2（表2），近30 a来，研究区冰川呈退缩趋势，不同时段退缩速率有所差异，其中1990—2000年，冰川面积退缩量为6.82±0.08 km^2，年均面积变化率为−0.34%·a^{-1}±0.004%·a^{-1}；2000—2010年，冰川面积退缩量为10.24±0.23 km^2，年均面积变化率为−0.53%·a^{-1}±0.011%·a^{-1}，高于第1时段；2010—2020年，冰川年均面积变化率为−0.75%·a^{-1}±0.030%·a^{-1}，远高于前2个时段，可见研究区冰川面积呈加速退缩趋势（图2）。与面积相比，波曲流域冰川数目呈增加趋势，1990、2000、2010年和2020年波曲流域冰川条数分别为157条、159条、163条和173条，冰川条数的增加速率也呈不断上升趋势。综上可知，近30 a来波曲流域冰川面积呈加速退缩趋势，而冰川数目正好相反。

表2 1990—2020年波曲流域冰川分布面积及变化特征

Tab. 2 Distribution area and variation characteristics of glaciers in Poiqu Basin during 1990—2020

年份	面积/km^2	退缩量/km^2	面积变化/%	年均面积变化率/%·a^{-1}
1990	198.95±14.58	–	–	–
2000	192.13±14.50	−6.82±0.08	−3.43±0.04	−0.34±0.004
2010	181.89±14.27	−10.24±0.23	−5.33±0.11	−0.53±0.011
2020	168.28±13.72	−13.61±0.55	−7.48±0.30	−0.75±0.030

2.2 不同海拔冰川分布及变化特征

以200 m为间隔，分析1990—2020年波曲流域不同海拔冰川分布和变化特征（图3），结果表明波曲流域冰川整体呈正态分布。以2020年为例，波曲流域内冰川主要分布在海拔5500~6100 m范围内，占流域冰川总面积的49.31%；4300~4500 m处，冰川分布面积最小，占比仅为0.12%。近30 a来，冰川退缩率随着海拔升高呈现先增加后减小趋势，其中海拔4300~4500 m范围内，冰川面积退缩率最高，达64.01%；海拔6900 m以上，冰川退缩率接近0。综上，冰川面积在高海拔地区较为稳定，低海拔地区退缩较快。

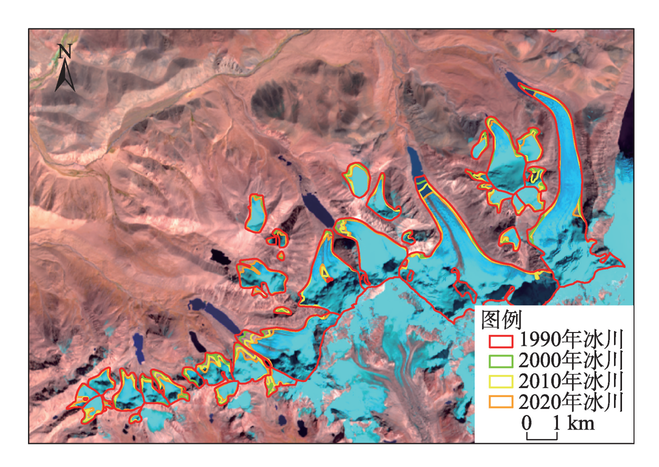


图2 1990—2020年波曲流域冰川变化

Fig. 2 Glacier changes in Poiqu Basin during 1990—2020

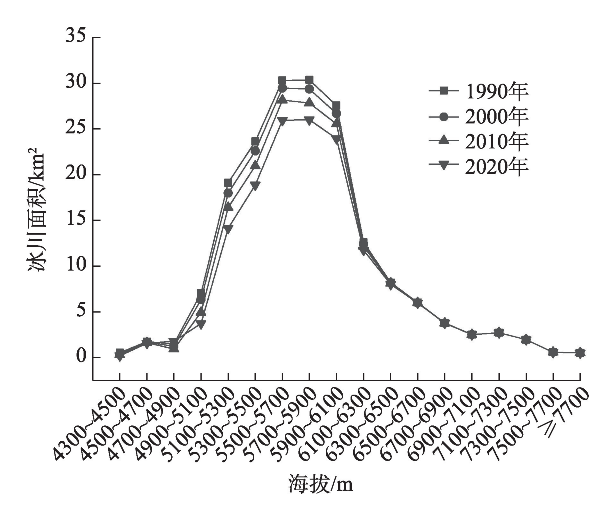


图3 1990—2020年不同海拔高度波曲流域冰川分布面积

Fig. 3 Distribution area of glaciers at different altitudes in Poiqu Basin during 1990—2020

2.3 不同规模等级冰川分布及变化特征

根据波曲流域冰川面积分布特征，将冰川规模划分为8个等级（≤0.1 km²，0.1~0.5 km²，0.5~1 km²，1~2 km²，2~5 km²，5~10 km²，10~20 km²，≥20 km²）（表3）。从面积角度看，1990年波曲流域主要以大冰川为主，规模≥10 km²的冰川面积为62.62 km²，占冰川总面积的31.47%，但数量较少，仅为3条，占冰川总条数的1.91%。从冰川条数分布规律发现，1990年波曲流域主要以小冰川为主，规模≤0.5 km²的冰川条数为93条，占冰川总条数的59.24%，其分布面积仅为19.99 km²，占比为10.05%。近30 a来，大规模（≥10 km²）冰川数量没有发生变化，但冰川分布面积由1990年的62.62 km²变为2020年的57.66 km²，退缩率为7.92%；小规模（≤0.5 km²）冰川新增28条，冰川数目变化率为30.11%，冰川面积退缩率为7.55%。总体而言，近30 a来大规模冰川数量较为稳定，小规模冰川数量呈增加趋势；大规模冰川面积呈退缩趋势，其余各规模冰川面积呈现出现不同程度波动态势，而规模≤0.1 km²冰川分布面积呈增加趋势。

表3 1990—2020年波曲流域不同规模冰川条数与面积统计

Tab. 3 Statistics on the number and area of glaciers of different sizes in Poiqu Basin during 1990—2020

冰川规模/km²	1990年		2000年		2010年		2020年	
	冰川条数	冰川面积/km²	冰川条数	冰川面积/km²	冰川条数	冰川面积/km²	冰川条数	冰川面积/km²
≤0.1	24	1.65	27	1.75	34	2.06	56	2.67
0.1~0.5	69	18.34	71	18.37	69	16.31	65	15.81
0.5~1	28	19.76	26	18.43	26	17.33	21	14.26
1~2	11	24.71	16	22.65	16	21.89	13	16.09
2~5	17	38.28	11	36.93	11	37.96	12	41.11
5~10	5	33.59	5	32.85	4	26.67	3	20.69
10~20	1	15.34	1	14.88	1	14.06	1	13.22
≥20	2	47.28	2	46.28	2	45.61	2	44.44
总计	157	198.96	159	192.14	163	181.89	173	168.28

2.4 冰湖分布面积及变化特征

波曲流域发育着大量的冰湖，通过近30 a遥感影像观测流域内冰湖面积和数量，发现其变化特征明显。1990、2000、2010年和2020年波曲流域冰湖总面积分别为11.17±2.79 km²，14.12±3.43 km²，16.57±3.79 km²和19.46±4.95 km²（表4），近30 a冰湖面积年均变化率为2.47%·a⁻¹±0.04%·a⁻¹。1990年流域内冰湖数量有57个，到2020年冰湖数量增加到104个，增加了47个不同程度大小的冰湖。说明波曲流域冰湖面积扩张趋势显著，且数量在不断增多（图4）。

表4 1990—2020年波曲流域冰湖分布面积及变化特征

Tab. 4 Distribution area and variation characteristics of glacier lakes in Poiqu Basin during 1990—2020

年份	面积/km²	变化量/km²	面积变化/%	年均面积变化率/%·a⁻¹
1990	11.17±2.79	–	–	–
2000	14.12±3.43	2.95±0.64	26.43±5.72	2.64±0.57
2010	16.57±3.79	2.45±0.36	17.38±2.54	1.74±0.25
2020	19.46±4.95	2.89±1.16	17.41±7.00	1.74±0.70

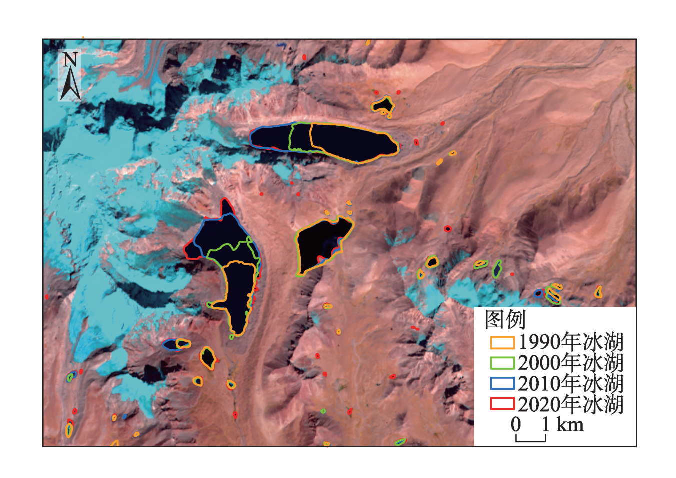


图4 1990—2020年波曲流域冰湖变化

Fig. 4 Glacier lake changes in Poiqu Basin during 1990—2020

2.5 不同海拔冰湖分布面积及变化特征

波曲流域冰湖主要分布在海拔4300~5700 m范围内（图5），其中海拔4900~5300 m之间冰湖分布面积较大，1990年该区间冰湖占流域冰湖总面积的80.35%。近30 a来，各海拔区间冰湖面积均表现出增长趋势，其中4500~4700 m范围冰湖面积扩张率最大，为301.71%；其次是海拔5500~5700 m范围，冰湖面积扩张率为239.73%。综上可知，冰湖主要发育在海拔4900~5300 m之间。

2.6 不同规模等级冰湖分布情况及变化特征

根据波曲流域内冰湖特征，将其规模划分为9

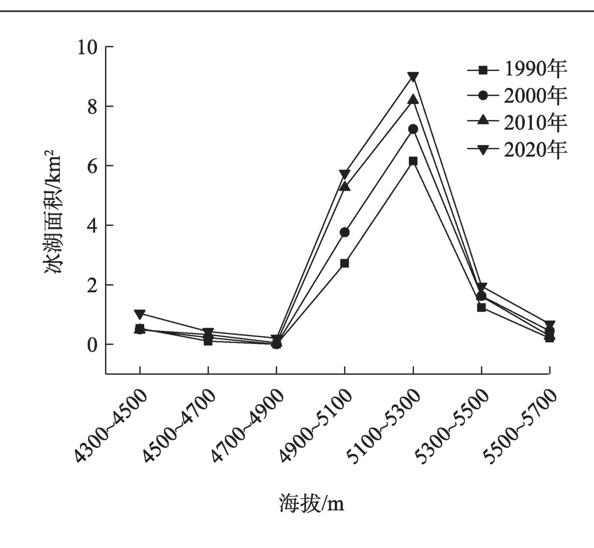


图5 1990—2020年不同海拔高度波曲流域冰湖分布面积

Fig. 5 Distribution area of glacier lakes at different altitudes in Poiqu Basin during 1990—2020

个等级(≤0.01 km²、0.01~0.02 km²、0.02~0.03 km²、0.03~0.04 km²、0.04~0.05 km²、0.05~0.06 km²、0.06~0.07 km²、0.07~0.4 km²、≥0.4 km²),以2020年为例,规模≥0.4 km²冰湖分布面积最大,为14.44 km²,占流域内冰湖总面积的74.20%,但数量较少,仅有8个(表5)。规模≤0.02 km²的冰湖在流域中数量最多(47个),占流域内冰湖总数的45.19%,但其分布面积较小,仅为0.49 km²,占比2.52%。近30 a不同规模冰湖分布面积和数量均呈现增加态势,其中,规模为0.03~0.04 km²,冰湖面积增加比率最大,规模为0.06~0.07 km²,冰湖面积增加比率最小。

2.7 冰湖扩张类型

冰湖的扩张受降水、蒸散发和冰川融水补给等多方面因素影响。其扩张程度往往与母冰川密不可分,对冰湖扩张类型进行划分有利于更深入探讨气候-冰川-冰湖三者之间的关系,本文依据前人对我国喜马拉雅山区冰湖扩张类型的划分规则[22],结合波曲流域冰湖特征,将本区104个冰湖与对应母冰川末端变化关系分为8种类型(表6和图6)。类型"a"为未补给型冰湖,是冰川消失或者退缩到不能直接补给位置的冰湖,该类冰湖有47个,占总体冰

表5 1990—2020年波曲流域不同规模冰湖条数与面积统计

Tab. 5 Statistics on the number and area of glacier lakes of different sizes in Poiqu Basin during 1990—2020

冰湖规模/km²	1990年		2000年		2010年		2020年	
	冰湖条数	冰湖面积/km²	冰湖条数	冰湖面积/km²	冰湖条数	冰湖面积/km²	冰湖条数	冰湖面积/km²
≤0.10	13	0.08	20	0.13	23	0.15	21	0.14
0.01~0.02	12	0.15	11	0.17	20	0.28	26	0.35
0.02~0.03	6	0.16	5	0.12	11	0.27	12	0.31
0.03~0.04	2	0.07	7	0.25	7	0.25	8	0.28
0.04~0.05	4	0.19	4	0.17	1	0.04	6	0.27
0.05~0.06	0	0.00	1	0.05	3	0.16	2	0.12
0.06~0.07	3	0.19	0	0.00	1	0.07	2	0.14
0.07~0.40	11	1.75	16	2.69	13	2.08	19	3.41
≥0.40	6	8.58	6	10.54	7	13.27	8	14.44
总计	57	11.17	70	14.12	86	16.57	104	19.46

表6 1990—2020年波曲流域面积扩张冰湖的类型

Tab. 6 Types of glacier lakes with expanding area in Poiqu Basin during 1990—2020

类型	名称	2020年				1990—2020年		
		冰湖数量	冰湖数量比例/%	冰湖面积/km²	湖-冰距离/m	母冰川进退/m	冰湖面积增量/km²	冰湖面积增率/%
a	未补给型	47	45.19	4.75	-	-	3.54	293.20
b	相连型	4	3.86	10.67	-	-729.25	5.47	105.16
c	初期相连,末期分离	6	5.77	0.75	1417.50	-196.50	0.57	318.59
d	不相连	21	20.19	1.62	680.24	-184.57	-2.27	-58.33
e	不相连(变化小)	6	5.77	0.64	372.67	-156.83	0.19	41.91
f	末端新增冰湖(相连)	1	0.96	0.49	-	-255.00	0.47	1653.13
g	末端新增冰湖(分离)	16	15.38	0.39	289.94	-160.06	0.26	204.05
h	末端新增冰湖(位置变化小)	3	2.88	0.15	249.67	-62.67	0.15	-
总计		104	100.00	19.47	-	-	8.38	-

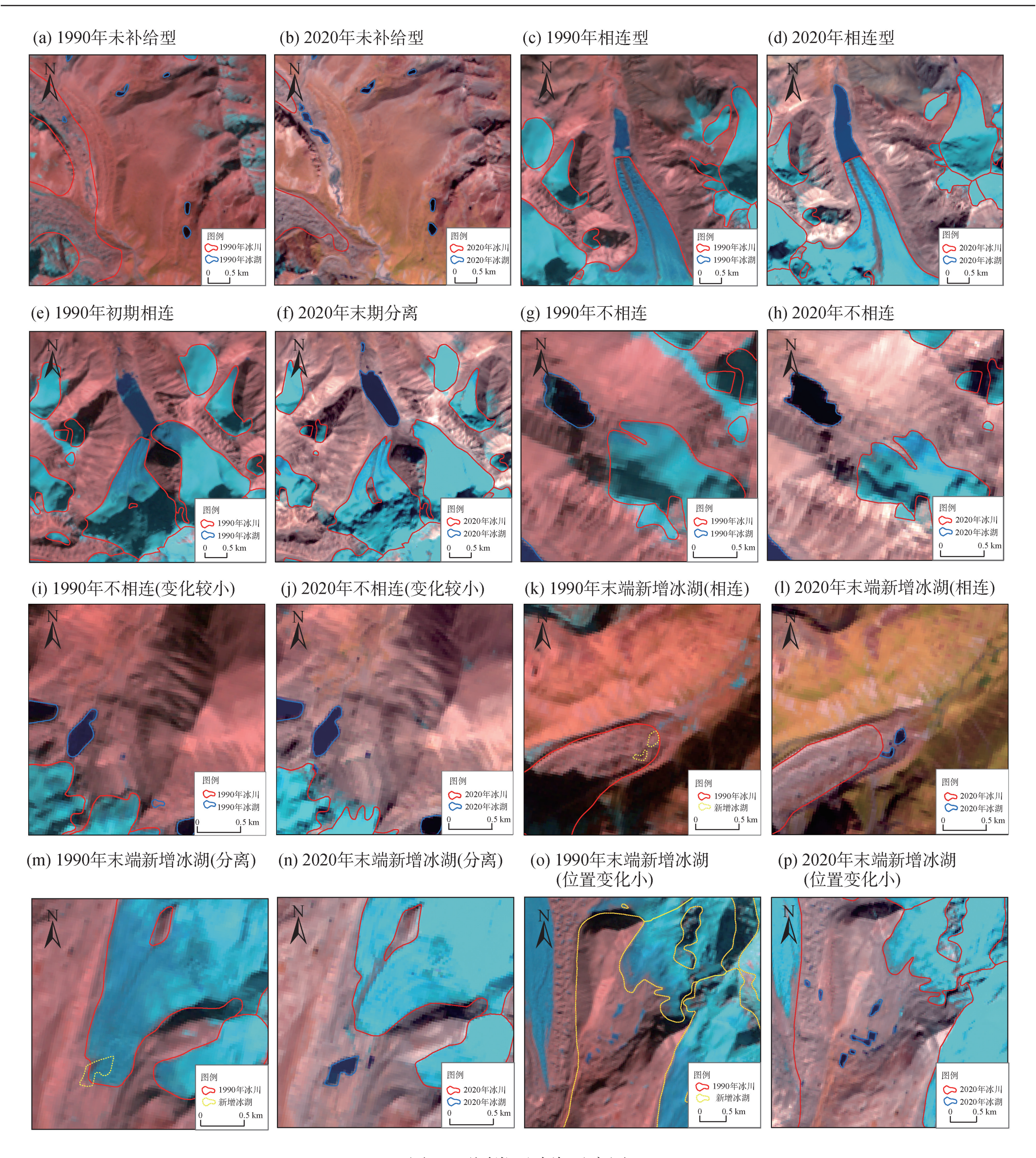


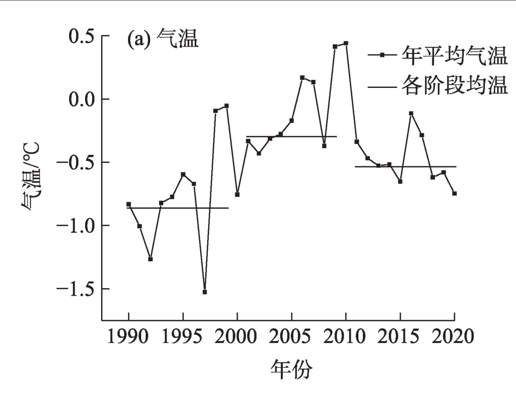
图6　不同类型冰湖示意图

Fig. 6　Diagram of different types of glacier lakes

湖面积增量的42.24%；类型“b~c”为母冰川与冰湖形成初期(1990年)位置相连，面积不断变化的冰湖，占总体冰湖面积增量的72.08%，是最主要的冰湖扩张类型；类型“d~e”为母冰川与冰湖形成初期(1990年)存在间距，面积不断变化的冰湖，占总体冰湖面积增量的-24.82%；类型“f~h”为冰川退缩过程中形成的冰湖，占总体冰湖面积增量的10.50%。波曲流域洼地众多，冰川退缩后形成大量小规模的冰碛湖。近30 a来随着冰川面积退缩，小规模冰碛湖无法直接得到母冰川的融水补给，一些规模小的冰川甚至消失，造就“a”类冰湖众多的现象。

2.8　冰川-冰湖变化对气候变化的响应分析

气候直接影响冰川的消融和积累，而冰川融水则会导致冰湖面积的扩张和数量的增加。因此，本文通过《青藏高原1901—2020年高分辨率气温和降水数据集》，选择1990—2020年气温和降水数据，分



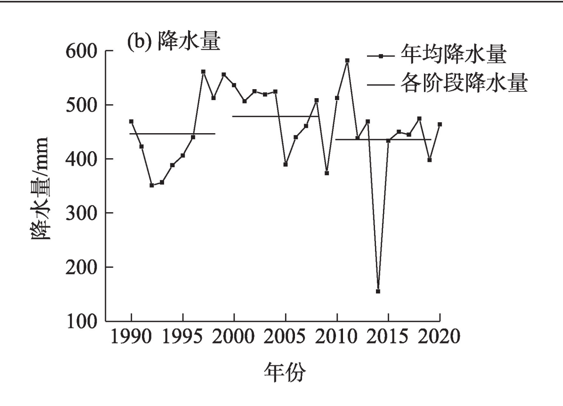


图7 1990—2020波曲流域气温和降水量

Fig. 7 Temperature and precipitation in Poiqu Basin during 1990—2020

析波曲流域近30 a气候变化特征情况。

波曲流域气温整体呈上升趋势(图7),近30 a平均气温为-0.45 ℃。以每10 a为间隔的年均气温进行分析,流域内气温升高了0.36 ℃。1997年流域内最低气温-1.52 ℃,之后气温骤升,2000—2010年流域内气温均值-0.14 ℃,高于近30 a研究区平均气温。近10 a气温有所回落,年均气温由2000—2010的-0.14 ℃下降到2010—2020年的-0.40 ℃。

近30 a波曲流域年均降水量为453.84 mm,降水量波动幅度较大,但整体呈略微下降的趋势。其中,1990—2000年年均降水量为454.54 mm,1992年为这10 a降水量谷值350.99 mm,在1997年达到峰值561.11 mm;2000—2010年年均降水量为481.48 mm,相较1990—2000年降水量增加了26.94 mm;2010—2020年年均降水量为438.35 mm,相比1990—2000年降水量下降了16.19 mm。

结合冰川和冰湖的退缩扩张变化分析:(1) 1990—2000年,年均气温-0.76 ℃,年均降水量454.54 mm。在此期间,冰川面积退缩6.82 km^2,冰川增加2条;冰湖面积微增,冰湖增加13个,其中小规模(≤0.03 km^2)冰湖增加5个。(2) 2000—2010年,年均气温-0.14 ℃,年均降水量481.48 mm,该阶段冰川面积退缩10.24 km^2,退缩率为5.33%,相较1990—2000年冰川退缩面积增加3.42 km^2,冰湖面积增加2.45 km^2,冰湖新增16个,其中小规模(≤0.03 km^2)冰湖新增18个,大规模(≥0.07 km^2)冰湖数量减少2个。综上分析,在降水量增幅较小的的情况下,气温大幅度的提升,增大了冰川的消融量,冰湖的蒸散发量,部分大规模冰湖退化为中小型规模冰湖,但大规模冰湖面积出现小幅度增加,表明升温导致的冰川融水可能是造成其冰湖面积增加的主要原因。(3) 2010—2020年年均气温和降水相较于2000—2010有所回落,降水量出现大幅度下降。在这期间冰川消融量大于冰川积累量,冰川面积不断退缩,冰湖不断扩展,与2000—2010年相比冰川冰湖的变化率均降低。

总体上,1990—2000年波曲流域冰川小部分退缩,出现部分小规模冰湖;2000—2010年流域内冰川大面积消融,各类型冰湖得到冰川融水补给,冰湖面积扩张;2010—2020年随着气温和降水的回落,冰川和冰湖的变化率减缓,但降水下降幅度大于气温下降幅度,冰川消融量大于冰川积累量,因此冰川不断退缩,冰湖不断扩张。

3 讨 论

冰川变化是气候变化的指示器,对气温波动对尤为敏感[23]。前人研究指出近年青藏高原地区气温升高速率明显增快[24],也是导致冰川退缩的直接原因。本研究统计指出近30 a来波曲流域气温整体呈现明显上升趋势,区域内冰川退缩趋势显著,小冰川数目增加;而冰湖扩张趋势也同样明显,尤其以冰川补给为主要补给来源的冰湖,即与母冰川相连的冰湖,成为主要扩张类型。冰湖母冰川周围环境地形因子造就了不同的湖盆特征(位置、面积等),利于湖盆发育的优势地形分布决定了冰湖分异[25]。学者研究喜马拉雅中段冰湖发现,冰川退缩导致的冰湖面积扩张达到122.1%[26]。可见,气温上升导致的冰川退缩是冰湖扩张的主导因素。此外,湖水温度的升高可能引起冰川末端热融效应,导致冰川末端退缩。因此,冰湖的扩张在一定程度上会加速冰川末端消融。

降水是冰川积累的重要要素，也是冰湖补给的水源之一。本文对近30 a来波曲流域降水量的统计，降水量整体略有下降，但波动变化较小。降水增加对于波曲流域冰川的积累作用并不明显，其对冰川退缩的缓解也效果甚微，降水下降则是导致冰川后退的因素之一。然而，降水可直接影响非冰川补给的冰湖扩张。非冰川补给湖同时受降水量和蒸发量影响，降水增加时，冰湖面积出现扩张趋势，但当气温上升显著，蒸发量对冰湖面积变化则更加明显[27]。特定情况下，冰川融水是冰湖扩张的主导因素，因此降水减少导致的冰川消融，会进一步促进冰湖面积的扩张。故降水下降也是造成冰川退缩和冰湖扩张的重要因素。

4 结 论

（1）1990—2020年波曲流域冰川加速退缩，在2010—2020年冰川退缩趋势尤为显著。冰川主要分布在海拔5500~6100 m，高海拔地区冰川稳定，低海拔地区冰川变化较大。大规模（≥10 km^2）冰川数量稳定，小规模（≤0.5 km^2）冰川数量增多。

（2）近30 a波曲流域冰湖数量、面积均不断增加，其中大冰湖（≥0.07 km^2）的分布面积不断扩张，小冰湖数量不断增加。

（3）通过分析母冰川-冰湖相对位置发现，冰湖与母冰川联系越紧密，冰湖面积扩张越显著。其中与母冰川相连冰湖，是最主要的冰湖扩张类型。

（4）近30 a波曲流域气温呈缓慢上升趋势，降水量略微下降。以每10 a为间隔，年均气温整体上升0.36 ℃，年均降水量下降16.19 mm。综合流域内近30 a气象数据，气温上升和降水量下降是造成冰川退缩重要因素，同时冰川融水促进冰湖的扩张。

参考文献（References）

[1] Huggel C, Carey M, Emmer A, et al. Anthropogenic climate change and glacier lake outburst flood risk: Local and global drivers and responsibilities for the case of lake Palcacocha, Peru[J]. Natural Hazards and Earth System Sciences, 2020, 20(8): 2175-2193.

[2] Rodriguez M, Ohlanders N, Pellicciotti F, et al. Estimating runoff from a glacierized catchment using natural tracers in the semi-arid Andes cordillera[J]. Hydrological Processes, 2016, 30(20): 3609-3626.

[3] Armstrong R L, Rittger K, Brodzik M J, et al. Runoff from glacier ice and seasonal snow in High Asia: Separating melt water sources in river flow[J]. Regional Environmental Change, 2019, 19(5): 1249-1261.

[4] 张正勇, 何新林, 刘琳, 等. 中国天山冰川生态服务功能及价值评估[J]. 地理学报, 2018, 73(5): 856-867. [Zhang Zhengyong, He Xinlin, Liu Lin, et al. Ecological service functions and value estimation of glaciers in the Tianshan Mountains, China[J]. Acta Geographica Sinica, 2018, 73(5): 856-867.]

[5] Immerzeel W W, Pellicciotti F, Bierkens M F P. Rising river flows throughout the twenty-first century in two Himalayan glacierized watersheds[J]. Nature Geoscience, 2013, 6(9): 742-745.

[6] Yi G H, Deng W, Li A, et al. Response of lakes to climate change in Xainza Basin Tibetan Plateau using multi-mission satellite data from 1976 to 2008[J]. Journal of Mountain Science, 2015, 12(3): 604-613.

[7] Yao T D. Glacial fluctuations and its impacts on lakes in the southern Tibetan Plateau[J]. Chinese Science Bulletin, 2010, 55(20): 2071-2071.

[8] Harrison S, Kargel J S, Huggel C, et al. Climate change and the global pattern of moraine-dammed glacial lake outburst floods[J]. The Cryosphere, 2018, 12(4): 1195-1209.

[9] 李林, 边巴次仁, 赵炜, 等. 西藏喜马拉雅山脉中段冰湖变化与溃决特征分析: 以桑旺错和什磨错为例[J]. 冰川冻土, 2019, 41(5): 1036-1043. [Li Lin, Bianba Ciren, Zhao Wei, et al. Analysis of change and outburst feature of glacial lake in the middle Himalayas of Tibet: Take Sangwang Co and Shimo Co as examples[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2019, 41(5): 1036-1043.]

[10] Veh G, Korup O, Walz A. Hazard from Himalayan glacier lake outburst floods[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2020, 117(2): 907-912.

[11] Jiang S, Nie Y, Liu Q, et al. Glacier change, supraglacial debris expansion and glacial lake evolution in the Gyirong River Basin, central Himalayas, between 1988 and 2015[J]. Remote Sensing, 2018, 10(7): 986, doi: 10.3390/rs10070986.

[12] Tan C, Ma M, Kuang H. Spatial-temporal characteristics and climatic responses of water level fluctuations of global major lakes from 2002 to 2010[J]. Remote Sensing, 2017, 9(2): 150, doi: 10.3390/rs9020150

[13] 徐道明, 冯清华. 西藏喜马拉雅山区危险冰湖及其溃决特征[J]. 地理学报, 1989, 44(3): 343-351, 385-352. [Xu Daoming, Feng Qinghua. Dangerous glacial lake and outburst features in Xizang Hymalayas[J]. Acta Geographica Sinica, 1989, 44(3): 343-351, 385-352.]

[14] 李震, 陈宁生, 张建平, 等. 波曲流域冰湖及其溃决灾害链特征分析[J]. 水文地质工程地质, 2014, 41(4): 143-152. [Li Zhen, Chen Ningsheng, Zhang Jianping, et al. Characteristics of the disaster chain of outburst and glacier lakes in the Boiqu River Basin [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2014, 41(4): 143-152.]

[15] 陈晓清, 崔鹏, 杨忠, 等. 近15 a喜玛拉雅山中段波曲流域冰川和冰湖变化[J]. 冰川冻土, 2005(6): 793-800. [Chen Xiaoqing, Cui Peng, Yang Zhong, et al. Change in glaciers and glacier lakes in Boiqu River Basin, middle Himalayas during last 15 years[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2005(6): 793-800.]

[16] Ji Q, Yang T, Li M, et al. Variations in glacier coverage in the Himalayas based on optical satellite data over the past 25 years[J]. Catena, 2022, 214: 106-240.

[17] Chen L, Zhang W, Yi Y, et al. Long time-series glacier outlines in the three-rivers headwater region from 1986 to 2021 based on deep learning[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2022, 15: 5734-5752.

[18] Pandey A, Sarkar M S, Kumar M, et al. Retreat of Pindari glacier and detection of snout position using remote sensing technology[J]. Remote Sensing Applications: Society and Environment, 2018, 11: 64-69.

[19] Gao B C. NDWI: A normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space[J]. Remote Sensing of Environment, 1996, 58(3): 257-266

[20] 汤远航, 李梦琦, 邓铃, 等. 1990—2020年朋曲流域冰川变化及其对气候变化的响应[J]. 干旱区地理, 2022, 45(1): 27-36. [Tang Yuanhang, Li Mengqi, Deng Ling, et al. Glacier change and its response to climate change in Pumqu Basin during 1990—2020[J]. Arid Land Geography, 2022, 45(1): 27-36.]

[21] 雷鹏嗣, 王伟财, 张太刚. 1990—2020年那曲地区冰湖变化研究[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2022, 58(6): 936-943. [Lei Pengsi, Wang Weicai, Zhang Taigang. Changes in glacial lakes in Naqu from 1990 to 2020[J]. Journal of Beijing Normal University (Natural Science Edition), 2022, 58(6): 936-943.]

[22] 李海, 杨成生, 惠文华, 等. 基于遥感技术的高山极高山区冰川冰湖变化动态监测——以西藏藏南希夏邦玛峰地区为例[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2021, 32(5): 10-17. [Li Hai, Yang Chengsheng, Hui Wenhua, et al. Changes of glaciers and glacier lakes in alpine and extremely alpine regions using remote sensing technology: A case study in the Shisha Pangma area of southern Tibet[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2021, 32(5): 10-17.]

[23] Sun M P, Liu S Y, Yao X J, et al. Glacier changes in the Qilian Mountains in the past half-century: Based on the revised First and Second Chinese Glacier Inventory[J]. Journal of Geographical Sciences, 2018, 28(2): 206-220.

[24] 王康, 张廷军, 牟翠翠, 等. 从第三极到北极:气候与冰冻圈变化及其影响[J]. 冰川冻土, 2020, 42(1): 104-123. [Wang Kang, Zhang Tingjun, Mou Cuicui, et al. From the Third Pole to the Arctic: Changes and impacts of the climate and cryosphere[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2020, 42(1): 104-123.]

[25] 王琼, 王欣, 雷东钰, 等. 山地冰川演化与冰湖发育相互作用机制[J]. 冰川冻土, 2022, 44(3): 1041-1052. [Wang Qiong, Wang Xin, Lei Dongyu, et al. The interaction mechanisms between mountain glacier evolution and glacial lake development[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2022, 44(3): 1041-1052.]

[26] Wang W C, Xiang Y, Gao Y, et al. Rapid expansion of glacial lakes caused by climate and glacier retreat in the Central Himalayas[J]. Hydrological Processes, 2015, 29(6): 859-874.

[27] 张伟华, 德吉央宗, 顿玉多吉, 等. 1995—2021年西藏萨普冰川-冰湖时空变化特征及气候响应分析[J]. 高原科学研究, 2023, 7(2): 10-20. [Zhang Weihua, Deji Yangzong, Dunyu Duoji, et al. Analysis on spatiotemporal changes and climate response of the Sapu glacier and glacier lake in Tibet from year 1995 to 2021[J]. Plateau Science Research, 2023, 7(2): 10-20.]

Temporal and spatial changes of glaciers and glacier lakes and its response to climate change in Poiqu Basin during 1990—2020

WANG Xiaoli, ZHOU Lingxiang, WANG Xiudong, HE Ying
(School of Geography and Tourism, Chongqing Key Laboratory of GIS Application Research, Chongqing Normal University, Chongqing 401331, China)

Abstract: Utilizing Landsat TM/ETM+/OLI imagery and digital elevation model (DEM) data, this study extracted the boundaries of glaciers and glacial lakes in Poiqu Basin, Xigaze City, Xizang Autonomous Region, China from 1990 to 2020 through the ratio threshold method and visual interpretation. The distribution and variation of glaciers and glacial lakes over three decades were analyzed, alongside the exploration of their co-evolution and response to climate change within the basin. The findings revealed: (1) A notable acceleration in glacier shrinkage within the Poiqu Basin over the last decade, with glaciers primarily situated between 5500 m and 6100 m. While the count of large-scale glaciers (≥10 km^2) remained constant, small-scale glaciers (≤0.5 km^2) exhibited an upward trend. (2) Both the number and area of glacial lakes witnessed a significant increase, with an expansion rate of 74.24%. Predominantly located between 4900 m and 5300 m, the expansion was more pronounced in larger glacial lakes (≥0.07 km^2), whereas smaller lakes (≤0.03 km^2) also saw a marked rise in numbers. (3) Glacial lakes connected to their parent glaciers emerged as the most significant type contributing to glacial lake expansion, registering a 72.08% increase. (4) The past 30 years have experienced a gradual temperature rise and a minor decline in precipitation. These climatic shifts, particularly the temperature increase and precipitation decrease, have been crucial in glacier retreat, while meltwater from glaciers has facilitated the expansion of glacial lakes. Through examining the distribution, changes, and interrelation of glaciers and glacial lakes in Poiqu Basin, this study aims to provide valuable data support for understanding glacier area dynamics and aiding in the prediction and mitigation of glacial lake outburst floods.

Key words: Poiqu Basin; glacier retreat; glacier lake expansion; climatic response